中国生态农业学报 2016 年 1 月 第 24 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2016, 24(1): 105−111

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150892

截形叶螨发育速率与温度关系模拟及对哒螨灵的抗性风险评估*

宋丽雯 沈慧敏**

(甘肃农业大学草业学院/草业生态系统省部共建教育部重点实验室/中−美草地畜牧业可持续发展中心 兰州 730070)

摘 要 为明确温度对截形叶螨抗哒螨灵种群(Py-R)和敏感种群(SS)风险发育速率的影响和评估截形叶螨对哒螨灵药剂的抗性风险，本试验在 16 ℃、20 ℃、24 ℃、28 ℃、32 ℃和 36 ℃ 6 个温度梯度下，用王−兰−丁模型拟合了两个种群的世代发育速率与温度的关系曲线，并采用了数量遗传学中的域性状分析法，估算了截形叶螨对哒螨灵的现实遗传力并预测了不同选择压力下截形叶螨对哒螨灵的抗性风险。研究结果表明，根据拟合的王−兰−丁模型推导，截形叶螨敏感种群 SS 世代发育的最低、最高临界温度分别为 10.05 ℃和 39.24 ℃，抗性种群 Py-R 发育最低、最高临界温度分别为 13.45 ℃和 41.89 ℃；抗性种群各螨态的最高临界温度值均显著大于敏感种群，表明截形叶螨抗哒螨灵种群对高温的忍耐程度和适应能力大于敏感种群。估算出的截形叶螨对哒螨灵的抗性现实遗传力(h^2)为 0.11，且抗性筛选前期和中期的 h^2 值为 0.12 和 0.18，大于筛选后期 h^2 值(0.08)，在筛选末期，h^2 值又回升到 0.14。在室内选择条件(h^2=0.11)下，选择压力即杀死率为 50%~90%时，预计抗性增长 10 倍，仅需 10~23 代；而在田间选择压力(h^2=0.05)下，同样条件下，抗性增长也只需 21~46 代。因此，截形叶螨对哒螨灵存在一定的抗性风险，可与其他不具交互抗性的杀虫剂之间进行轮用，并降低选择压来延缓抗药性的产生。

关键词 截形叶螨 发育速率 温度 哒螨灵 抗性风险
中图分类号: S435.12.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)01-0105-07

Simulation of developmental rate and temperature trend, and assesement of resistance risk to pyridaben of *Tetranychus truncatus* Ehara*

SONG Liwen, SHEN Huimin**

(College of Prataculture, Gansu Agricultural University / Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education / The Sino-U.S. Center for Grazing-land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract In recent years, *Tetranychus truncatus* Ehara has become one of the main pests in Hexi area of Gansu Province, for which pyridaben was widely used due to its special physiological mechanism and broad-spectrum efficiency. However, *T. truncatus* has developed resistance to the sole application of pyridaben for a long perod of time. The aim of this paper was to verify the effect of temperature on risk development rate of resistant and susceptible populations of *Tetranychus truncatus* Ehara. Then based on the results of resistance selection, the study evaluated the resistance risk of *T. truncatus* to pyridaben. To do this, the relationship between development rate and temperature was analyzed using the Wang-Lan-Ding model at six temperatures (16 ℃, 20 ℃, 24 ℃, 28 ℃, 32 ℃ and 36 ℃). The realized heritability (h^2) of *T. truncatus* was estimated and the resistance risk of *T. truncates* to pyridaben under different resistance selection pressure predicted on the basis of resistance

* 公益性行业(农业)科研专项(201103020)、国家自然科学基金项目(31260442)和盛彤笙科技创新基金项目(GSAU-STS-1518)资助
** 通讯作者: 沈慧敏，研究方向为农业害螨(虫)抗药性。E-mail: ndshm@gsau.edu.cn
宋丽雯，研究方向为有害生物综合治理和害虫抗药性。E-mail: songlw@gsau.edu.cn
收稿日期: 2015−08−07 接受日期: 2015−11−03

* Supported by the Special Fund for Agro-Scientific Research in the Public Interest (No. 201103020), the National Natural Science Foundation of China (No. 31260442) and the Sheng Tongsheng Innovation and Technology Fund (GSAU-STS-1518).
** Corresponding author, E-mail: ndshm@gsau.edu.cn
Received Aug. 7, 2015; accepted Nov. 3, 2015

breeding and selection in the laboratory. Then threshold trait analysis was done in quantitative genetics to provide a theoretical support for the application of pyridaben and comprehensive control of *T. truncatus*. The results showed that based on the fitted Wang-Lan-Ding models, the minimum and maximum boundary temperatures of susceptible populations were 10.05 ℃ and 39.24 ℃, whereas that of the resistant populations were 13.45 ℃ and 41.89 ℃, respectively. The fitted models also showed that the maximum boundary temperature of resistant populations was significantly greater than that of susceptible populations. This implied that resistant populations had much stronger suitability to extreme temperatures than susceptible populations. The realized heritability (h^2) of *T. truncatus* resistance to pyridaben was 0.11, and h^2 for the first period and mid-term selection experiment (0.12 and 0.18, respectively) was higher than that for the later period (0.08), but h^2 (0.14) sharply increased at terminal stage. Under laboratory conditions with h^2 = 0.11, developing a 10-fold increase of resistance to pyridaben required 10–23 generations under selection pressure (mortality) of 50%–90%. Under field conditions (h^2 = 0.05), it required 21–46 generations to develop the same resistance level. The results suggested that *T. truncatus* had resistance risk to pyridaben. However, when pyridaben was applied under rotation with other insecticides without cross-resistance and reduced selection pressure, the resistance development rate of *T. truncatus* delayed.

Keywords *Tetranychus truncatus*; Developmental rate; Temperature; Pyridaben; Resistance risk

近年来，随着甘肃省河西地区制种玉米面积的逐年扩大和集中连片种植，农田生态环境发生了改变，加之高温干旱气候的影响，致使玉米叶螨危害严重。据报道，为害叶螨种类主要为截形叶螨(*Tetranychus truncatus* Ehara)、朱砂叶螨(*T. cinnabarinus* Boisdural)和二斑叶螨(*T. urticae* Koch)，其中截形叶螨为各地玉米田的优势种[1–2]。该螨寄主范围广，除了为害玉米，还可为害棉花、甜菜、黄豆、茄子和杂草等。由于长期施用化学药剂防治，截形叶螨已对甲胺磷、马拉硫磷、三氯杀螨醇和甲氰菊酯等许多常用杀虫杀螨剂产生了抗药性[3–5]，给防治造成较大困难。

昆虫生长发育过程中，温度是最显著的一个生态影响因子。但目前为止对于叶螨抗药性研究都一直以不同温度条件下，生物适合度(biological fitness)的优劣反映叶螨种群对外界环境条件的反应，如何林等[6]、陈文博等[7]、付海波等[8]先后报道了抗性叶螨种群与敏感叶螨种群，在不同温度条件下，适合度处于不同的优势或劣势，但仍不能解释抗性种群长期存活的根本原因。

如果假设温度是有机体发育惟一的限制因子，那么发育的风险主要来自极端的低温和高温区。那些存活下来并繁衍至今的生物种群，都是避开风险而未遭淘汰，它们对于风险发育速率(低温和高温下的极限发育速率)十分敏感，总力图回避[9]。如周亦红等[10]用 Logistic 模型和王–兰–丁模型拟合了美洲斑潜蝇和南美斑潜蝇世代发育速率(V)与温度(T)之间的关系，得出了两种斑潜蝇的适宜生存的温度范围，解释了美洲斑潜蝇分布广泛，为害严重，而南美洲斑潜蝇则主要在气候较为温和或相对冷凉的地区容易暴发成灾的原因。同理，产生抗药性的叶螨之所以能在同自然环境中存活下来，与敏感种群相比，其在同环境的相互作用中应该采取了一种使风险最小的生态对策，避开了风险发育速率。它们对于风险发育速率(低温和高温下的极限发育速率)十分敏感，总力图回避，因而可利用发育速率和温度间的关系模型预测出抗性种群和敏感种群的风险发育速率的差异，从而明确抗性种群存活的极端温度范围，为抗性治理提供一定的理论依据。

此外害虫抗药性的发展趋势主要是由其抗性基因所决定，抗性基因在害虫不同世代之间能够遗传，在害虫的世代交替过程中其抗性基因遗传程度的大小与抗性遗传力密切相关[11]。并且在许多情况下，害虫的抗药性是一种数量性状，是由 1 个主效基因和数个微效基因共同起作用，因此用数量遗传的方法可以对抗性遗传变异的速率和变异的潜在范围作出预测。如 Holloway[12]估计了稻象鼻虫(*Sitophilus oryzae*)对甲基虫螨磷的击倒时间的遗传力 h^2_n 为 0.474±0.294，表明大约有 47%的抗性表现型方差是可以遗传的。孟香清等[13]研究发现氰戊菊酯对棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)的抗性狭义遗传力(0.462 5±0.157 8)>氯氰氰菊酯(0.247 6±0.024 8)，说明棉铃虫对氰戊菊酯的抗性发展速度快于氯氰氰菊酯。而目前关于害螨抗性现实遗传力及抗药性风险评估的研究，国内外少有报道，仅何林[14]和何恒果[15]分别对朱砂叶螨(*Tetranychus cinnabarinus*)和桔全爪螨(*Panonychus citri*)的北碚种群进行了现实遗传力的估算。

哒螨灵属线粒体电子传递抑制剂(mitochondrial electron transport inhibitors, METI)，主要抑制辅酶 Q_0 处电子传递，该药剂现在是我国杀螨剂的主要品种之一[16]。因其结构新颖、作用机制独特，杀叶螨高效、广谱，目前在大田应用较为广泛，但长期大面

积、单一的使用，易导致截形叶螨抗药性的产生。因此进行截形叶螨对哒螨灵药剂的抗性现实遗传力的估算和抗性风险评估，可以为哒螨灵在田间的合理使用和应用前景提供一定的理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试螨类

截形叶螨敏感种群(SS)从未施用任何农药的甘肃农业大学试验玉米田采集，在实验室恒温养虫室内，用盆栽菜豆苗连续饲养约 90 代以上，不接触任何药剂。抗哒螨灵种群(Py-R)由甘肃农业大学草业学院昆虫实验室选育得到，抗性倍数为 955.25[17]。饲养条件为：温度(24±l) ℃，相对湿度 60%±5%，光周期为 L∶D=16h∶8h。

1.2　试验种群发育历期测定和发育速率–温度的关系拟合

试验在光照培养箱中进行，截形叶螨用盆栽菜豆苗饲养。设置温度为 16 ℃、20 ℃、24 ℃、28 ℃、32 ℃和 36 ℃ 6 个温度梯度，饲养期间停止用药。敏感和抗性种群各饲养 60 头。每个菜豆叶片接 1 只雌成螨，产卵后即弃去，保留新鲜卵 1 粒。逐日记载单头叶螨发育历期及成活状况，直至死亡。

最后根据不同温度对截形叶螨抗性和敏感种群生物学参数的影响结果[18]，将发育历期(N)转换成发育速率(V)后，在计算机上采用 Marquardt 阻尼最小二乘法选代[19]，拟合出各螨态发育速率 V 和温度 T 之间的王–兰–丁模型[9]。模型拟合公式如下：

$$V(T)=\frac{K}{1+\exp[-r(T-T_0)]}\times\left[1-\exp\left(-\frac{T-T_\mathrm{L}}{\delta}\right)\right]\times\left[1-\exp\left(-\frac{T_\mathrm{H}-T}{\delta}\right)\right] \quad (1)$$

该模型是在 Logistic 模型基础上用渐近匹配法推导得出，适用于昆虫的整个发育温区。式中 K 为高温下潜在的饱和发育速率；r 为发育速率随温度变化的指数增长率；T_L、T_H 分别为最低、最高临界发育温度；T 为设定的试验温度；T_0 为最适发育温度；δ为边界层的宽度，其相对大小反映了昆虫对极端温度的不同忍耐程度。

该模型中 7 个参数值的估算参考文献[20]。

1.3　供试药剂和抗性筛选处理

供试药剂为 15%哒螨灵乳油(江苏蓝丰生物化工股份有限公司)。从敏感种群中分出截形叶螨部分个体，待扩繁后用哒螨灵连续处理 49 代。每喷 3~5 次药剂进行一次室内毒力测定，设置 7 个浓度梯度，每一浓度取 30 头螨，重复 3 次，计算其致死中浓度(LC_{50})，并与敏感种群比较，掌握抗药性的发展趋势，具体筛选结果参考文献[17]。

1.4　数据处理

所有数据分析均用 SPSS 19.0 和 Microsoft Excel 软件进行。现实遗传力(h^2)的估算和抗性风险评估参照以下公式进行计算。

1.4.1　现实遗传力(h^2)的估算

采用 Tabashnik[21]的域性状分析法对抗性现实遗传力(realized heritability)进行估算，即：

$$h^2=R/S \quad (2)$$

其中：

$$R=[\lg(终\ LD_{50})-\lg(初\ LD_{50})]/n \quad (3)$$

$$S=i\delta_p \quad (4)$$

$$i=1.583-0.019\,333\,6P+0.000\,042\,8P^2+3.651\,94/P\quad(10\%\leqslant P\leqslant 80\%) \quad (5)$$

$$\delta_p=1/[(b_1+b_n)/2] \quad (6)$$

式中：h^2 为现实遗传力；R 为选择响应，指亲本的后代与亲本世代的群体平均表型值之差；S 为选择差，指亲本个体平均表型值距群体平均值的离差；n 为选择代数；i 为选择强度；P=1–平均校正死亡率；δ_p 为标准差；b_1 为亲代的机率回归线斜率，b_n 为选择 n 代后子代的机率回归线斜率。

1.4.2　抗性风险评估

根据 $R=[\lg(终\ LD_{50})-\lg(初\ LD_{50})]/n$ 变型可得，$R=\lg(终\ LD_{50}/初\ LD_{50})/n$，根据现实遗传力 h^2，可以预测筛选后抗性上升 x 倍所需代数[$Gx=\lg x/(h^2S)$]。参照文献[14]，当用药剂汰选产生 10 倍抗性(即终 LD_{50}/初 LD_{50}=10)时，所需的汰选代数 $G=\lg(10/R)=1/R$。

2　结果与分析

2.1　截形叶螨敏感和抗性种群各螨态及世代发育速率与温度关系的模拟

用王–兰–丁模型拟合截形叶螨敏感种群和抗哒螨灵种群的卵、幼螨、若螨及世代发育速度(V)与温度(T)之间的关系，模拟参数见表 1，发育速率(V)与温度(T)之间的模型曲线见图 1(因若螨的模型参数未能模拟出，故表中只列出了卵、幼螨和世代的 3 个模型参数）。

由表 1 可知，截形叶螨敏感种群 SS 世代发育的最低、最高临界温度分别为 10.05 ℃和 39.24 ℃，最适发育温度为 25.73 ℃；抗性种群 Py-R 发育最低、最高临界温度分别为 13.45 ℃和 41.89 ℃，最适发育温度为 26.04 ℃。并且抗性种群各螨态的最高临界温度值均显著大于敏感种群，因此两种群相比较而言，抗哒螨灵种群对高温的适应能力显著强于

表 1 截形叶螨哒螨灵敏感(SS)和抗性(Py-R)种群发育速率与温度关系模型参数(王–兰–丁模型参数)

Table 1 Parameters of developmental rate and temperature models (Wang-Lan-Ding models) of pyridaben- resistant population (Py-R) and susceptible populations (SS) of *Tetranychus truncatus*

螨态 Mite stage	种群 Population	王–兰–丁模型参数 Parameter of Wang-Lan-Ding model						
		K	r	T_0	T_L	δ_L	T_H	δ_H
卵 Egg	SS	0.51±0.5a	0.09±0.8a	26.19±0.8a	13.73±0.8a	1.60±0.6a	38.98±0.4a	4.16±0.5a
	Py-R	0.55±0.8a	0.09±0.6a	27.49±1.1b	10.33±0.6b	5.97±0.4b	41.70±0.7b	5.81±0.8b
幼螨 Larva	SS	1.21±0.5a	0.19±0.5a	26.35±0.6a	11.21±1.1a	3.89±0.6a	38.83±0.6a	3.96±0.4a
	Py-R	1.31±0.6b	0.19±0.4a	26.32±0.5a	13.46±0.6b	1.94±0.5b	40.28±1.1b	7.63±0.5b
世代 Generation	SS	0.18±0.4a	0.10±0.8a	25.73±1.2a	10.05±0.5a	3.42±1.1a	39.24±0.8a	3.99±1.2a
	Py-R	0.19±0.5a	0.11±1.2a	26.04±0.8b	13.45±0.7b	2.09±0.9b	41.89±0.6b	5.82±0.8b

表中数据为平均值±标准误差，同列数据后不同字母者表示抗性种群和敏感种群经 Duncan 新复极差检验差异显著($P<0.05$)。K: 高温下潜在饱和发育速率; r: 发育速率随温度变化的指数增长率; T_L、T_H: 最低、最高临界发育温度; T_0: 最适发育温度; δ_H: 边界层的宽度。Data in the table are mean±SE. Different letters in the same column show significant difference between susceptible and resistant populations by Duncan' s test ($P < 0.05$). K: potential saturated developmental rate at high temperature; r: exponential growth rate with temperature variation; T_L and T_H: minimum and maximum critical developing temperatures; T_0: optimum developing temperature; δ_H: boundary layer width.

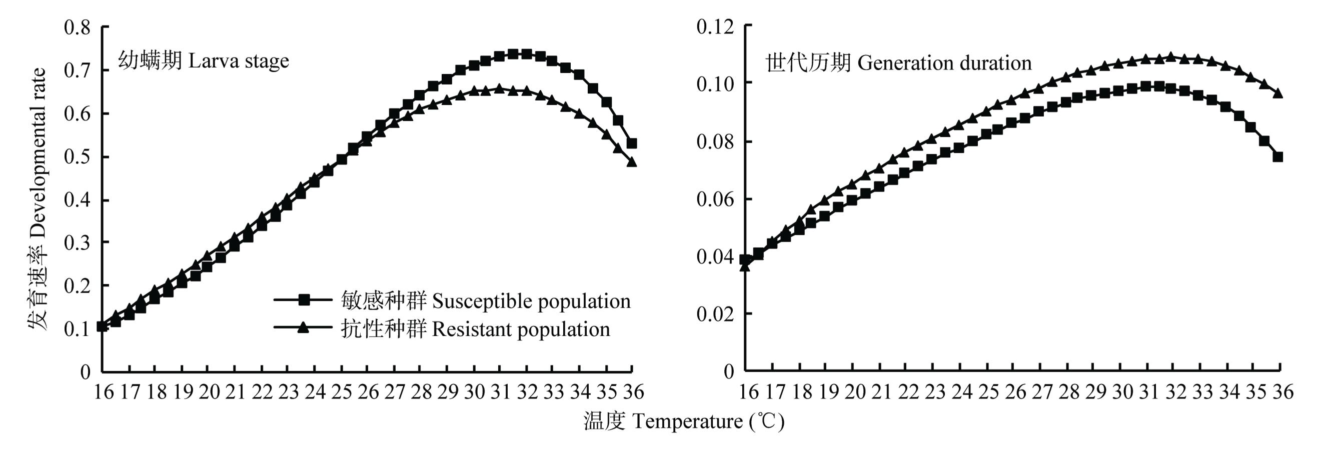


图 1 截形叶螨哒螨灵敏感种群(SS)和抗哒螨灵种群(Py-R)不同发育阶段发育速率与温度的王–兰–丁模型拟合曲线

Fig. 1 Fitted curves of developmental rate and temperature of pyridaben- resistant population (Py-R) and susceptible population (SS) of in *Tetranychus truncatus* at different stages with Wang-Lan-Ding models

敏感种群，但对发育要求的最低温度显著高于敏感种群，即对低温适应能力较弱，拟合结果与试验观察结果相符。

2.2 截形叶螨对哒螨灵的抗性现实遗传力

由表2可知，整个筛选期(F_0—F_{49})连续50代估算的截形叶螨对哒螨灵的抗性现实遗传力为0.11。筛选前期(F_0—F_5)连续6代筛选h^2值为0.12；筛选中期，经F_{10}—F_{20}连续11代筛选，h^2的估计值最高，为0.18；筛选后期(F_{25}—F_{35})，估计的h^2值较低，仅为0.08，比筛选前期和中期显著下降；而在筛选末期(F_{40}—F_{45})，h^2值回升到0.14。这些数据表明，截形叶螨田间种群存在抗性基因，因遗传变异而使抗性表现型在下代可实现的比例 h^2较大，抗性发展较快，但随着筛选的进行，敏感基因逐步被淘汰，抗性基因在种群中逐渐趋于稳定，遗传变异在抗性表现型中所占比例下降，抗性发展减慢，h^2减小。

另外，抗性现实遗传力反映的是一个性状从一代遗传到下一代的程度，在影响表现型值的诸多因子中只有加性遗传值是固定的、可遗传的，只有它才会对后代的性状产生影响。因此狭义遗传力(h^2)定义为加性遗传方差与整个表型方差的比率。结合表 3可以看出，选择压力和抗性现实遗传力大的，其抗性发展速率较快。

2.3 截形叶螨对哒螨灵的抗性风险评估

假设哒螨灵对截形叶螨的杀死率为50%、60%、70%、80%、90%，对抗性提高10倍所需的代数分别进行预测(假设筛选前后毒力回归线的斜率为2.0，即δ_p=0.5，该假设的斜率与筛选前后的斜率接近)[22–23]。从表3可以得出：药剂杀死率为50%~90%时(即选择强度P为10%~50%)，预计截形叶螨对哒螨灵的抗性增长到10倍，仅需10~23代。考虑到室内的汰选环境相对固定，环境方差较野外小，汰选试验估算的现实遗传力值(h^2=0.11)可能比野外的实际值偏高，因此假设遗传力田间估算值为实验室汰选值的一半，即h^2=0.05，则同样条件下，也只需21~46代，截形叶螨对哒螨灵的抗性就能增长到10倍，存在很大的抗性风险。

表 2　截形叶螨对哒螨灵的抗性现实遗传力

Table 2　Realized heritability of resistance to pyridaben of *Tetranychus truncatus*

筛选代数 Selection generation	平均选择反应 Estimate of selection response			平均选择差异 Estimate of mean selection difference						现实遗传力(h^2) Realized heritability
	始 LD_{50} Initial LD_{50}	终 LD_{50} Final LD_{50}	选择反应(*R*) Response to selection	存活率(*P*) Survival rate	选择强度(*i*) Selection intensity	始斜率 Initial slope	终斜率 Final slope	标准差(δ_p) Standard deviation	选择差异(*S*) Selection differences	
6(F_0—F_5)	17.08	50.57	0.079	22.63	1.329	1.793	2.329	0.485	0.645	0.12
11(F_{10}—F_{20})	330.78	1 604.94	0.062	37.72	1.011	2.179	3.775	0.336	0.340	0.18
11(F_{25}—F_{35})	2 442.69	4 180.65	0.021	41.25	0.947	2.747	4.699	0.269	0.254	0.08
6(F_{40}—F_{45})	6 606.70	11 767.10	0.042	48.86	0.815	3.135	2.250	0.371	0.303	0.14
50(F_0—F_{49})	17.08	16 253.59	0.060	35.80	1.048	1.793	2.056	0.520	0.545	0.11

表 3　不同选择压力下实验室和田间截形叶螨对哒螨灵的抗性风险评估

Table 3　Resistance risk assessment of *Tetranychus truncatus* to pyridaben with laboratory heritability and estimated field heritability under different selection pressures

环境条件 Environment [heritability (h^2)]	选择压(*P*) Selection pressure (%)				
	50	40	30	20	10
实验室 Laboratory [heritability (0.11)]	23	19	16	13	10
田间估算 Estimated field [heritability (0.05)]	46	38	31	26	21

表中数据(抗性风险)为抗性增长 10 倍所需的代数。Values (resistance risk) in the table are generations number required for 10-fold increase in resistance.

3　结论与讨论

本研究用王–兰–丁模型拟合了截形叶螨敏感和抗性种群的世代发育速率与温度的关系曲线，结果表明截形叶螨敏感种群SS世代发育的最低、最高临界温度分别为10.05 ℃和39.24 ℃，抗性种群Py-R发育最低、最高临界温度分别为13.46 ℃和41.89 ℃。甘肃省河西走廊中部地区(主要指张掖市)年平均气温为 6.0~14.3 ℃，极端最高气温40.0 ℃，与该模型模拟的抗性种群和敏感种群的极端温度范围基本一致，也与前期研究截形叶螨抗哒螨灵种群在高温下具有生物适合度优势的结论相吻合[18]。即：田间抗性种群对高温的适应能力增强，其存活能力和生殖力优于敏感种群。因此，该模型解释了在高温干旱季节截形叶螨经常爆发成灾，并难以防治的原因。何林[14]曾利用王–兰–丁模型拟合了朱砂叶螨敏感种群、抗甲氰菊酯种群和抗阿维菌素种群的世代发育速率与温度的关系，研究发现：朱砂叶螨抗甲氰菊酯种群最高临界温度(36.1 ℃)与敏感种群(36.0 ℃)没差异；而抗阿维菌素种群最高临界温度为42.4 ℃，对高温的适应能力比敏感种群有大幅提高。这些结果可能预示着叶螨对药剂产生抗药性与其对高温的忍耐力之间存在着某种必然联系。因此我们可以推测，害螨对药剂产生抗药性后，在同环境的相互作用中应该采取了一种使风险最小的生态对策，避开了风险发育速率，即提高了对高温的适应能力。

那么产生抗性的昆虫如何对高温产生适应性，具体机理是什么？目前，动物对高温适应的机理研究主要集中在生物界普遍存在的热激蛋白和保护酶(SOD、CAT和POD)等活性的变化[24–25]。截形叶螨对哒螨灵产生抗性后是否也与其体内热激蛋白的大量表达和保护酶变化有关，从而具有更好的高温适应性，其内在机理将是今后研究的内容。

本研究应用阈性状分析法估算出截形叶螨对哒螨灵的现实遗传力估算值 h^2 为 0.11，存在一定的抗性风险。当然室内抗性筛选得到的现实遗传力与田间实际情况有所不同。根据计算现实遗传力的原理和公式可知，现实遗传力值常受到以下几方面的影响：受试个体受药不均、存活个体亚致死效应差异、雌雄个体受不等选择等。这些影响可能导致对抗性现实遗传力的低估或高估。此外，室内选择是在恒温、恒定的光周期下饲养，连续进行筛选，因此环境方差易被低估。同时田间由于抗性个体的迁出和敏感个体的迁入以及环境和选择压力、交替用药或轮换用药、基因突变等因素影响使抗性基因得到稀释，从而延缓抗性发展的速度，使田间的现实遗传力 h^2 可能偏小[26]。由以上分析可看出，较多的因素导致最后现实遗传力值被低估或高估。本文假设遗传力田间估算值为实验室汰选值的一半，即 h^2=0.05，药剂杀死率为 50%~90%时(即选择强度 *P* 为 10%~50%)，预计截形叶螨对哒螨灵的抗性增长到 10 倍，需要汰选的代数为 21~46 代，比实验室估算值(10~23 代)多 1 倍。虽然室内结果存在一定的误差，不能直接用于田间，但仍然可以作为参考，指导田间防治过程中及时进行抗性监测，以制定相应的预防性抗性治理策略。根据以上研究结果来看，截形叶螨对哒螨灵具有高抗性的危险，建议田间防治截形叶螨时应限制哒螨灵的使用次数，同时与其他不具交互抗性的

杀虫剂之间进行交替轮换使用，降低选择压，以延缓抗药性的产生。

参考文献 References

[1] 罗光宏. 危害我省玉米的红蜘蛛为截形叶螨[J]. 甘肃农业科技, 1990(9): 24
Luo G H. *Tetranychus truncatus* was the most harmful red mites in Gansu Province[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 1990(9): 24

[2] 姜双林. 甘肃东部叶螨科的种类组成及其生态分布[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(1): 153
Jiang S L. The species composition and ecological distribution of Tetranychidae in eastern Gansu[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007, 13(1): 153

[3] 陈志杰, 张淑莲, 张锋, 等. 陕西省夏播玉米田叶螨发生及抗性治理对策研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2003, 31(S2): 101–104
Chen Z J, Zhang S L, Zhang F, et al. Study on resistible control of leaf mites upon corn summer seeding in Shaanxi[J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 2003, 31(S2): 101–104

[4] 牛瞻光, 李宁, 张淑静, 等. 冬枣截形叶螨抗药性及其防治对策[J]. 山东林业科技, 2006(1): 48–49
Niu S G, Li N, Zhang S J, et al. Resistible control of *Tetranychus truncatus* on winter jujube[J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 2006(1): 48–49

[5] 张丽华, 车丽梅, 李伟. 不同杀螨剂对截形叶螨的毒力测定及田间药效试验[J]. 吉林农业科技学院学报, 2011, 20(1): 10–11
Zhang L H, Che L M, Li W. Virulence determination and field efficacy test on different acaricides against *Tetranychus truncatus* Ehara[J]. Journal of Jilin Agricultural Science and Technology College, 2011, 20(1): 10–11

[6] 何林, 薛传华, 赵志模, 等. 朱砂叶螨抗性品系不同温度下的相对适合度[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2449–2454
He L, Xue C H, Zhao Z M, et al. Relative fitness of *Tetranychus cinnabarinus* resistant strains at different temperatures[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(11): 2449–2454

[7] 陈文博, 孙磊, 杨涛, 等. 土耳其斯坦叶螨对阿维菌素和哒螨灵抗药性机理及抗性适合度研究[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(2): 229–235
Chen W B, Sun L, Yang T, et al. Study on pesticide resistance mechanisms and resistant fitness of *Tetranychus turkestani* in abamectin and pyridaben[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48(2): 229–235

[8] 符海波, 张志刚, 沈慧敏, 等. 二斑叶螨对螺螨酯抗性和敏感种群相对适合度的研究[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 115–117
Fu H B, Zhang Z G, Shen H M, et al. Biological fitness of the spirodiclofen-resistant and sensitive population of *Tetranychus urticae*[J]. Plant Protection, 2011, 37(5): 115–117

[9] 王如松, 兰仲雄, 丁岩钦. 昆虫发育速率与温度关系的数学模型研究[J]. 生态学报, 1982, 2(1): 47–57
Wang R S, Lan Z X, Ding Y Q. Studies on mathematical models of the relationship between insect development and temperature[J]. Acta Ecologica Sinica, 1982, 2(1): 47–57

[10] 周亦红, 姜卫华, 赵志模, 等. 温度对美洲斑潜蝇及南美斑潜蝇种群增长的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(8): 1276–1284
Zhou Y H, Jiang W H, Zhao Z M, et al. Effect of temperature on the population increase of *Liriomyza sativae* and *Liriomyza huidobrensis* (Diptera: Agromyzidae)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(8): 1276–1284

[11] 孟香清, 赵建, 周魏岑. 研究害虫抗药性遗传力的几种方法[J]. 农药科学与管理, 1999, 20(2): 20–24
Meng X Q, Zhao J, Zhou W C. Three methods for estimating the heritability of pest resistance[J]. Pesticide Science and Administration, 1999, 20(2): 20–24

[12] Holloway G J. The potency and effect of phytotoxins within yellow split-pea (*Pisum sativum*) and adzuki bean (*Vigna angularis*) on survival and reproductive potential of *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae)[J]. Bulletin of Entomological Research, 1986, 76(2): 287–295

[13] 孟香清, 芮昌辉, 赵建周, 等. 棉铃虫对菊酯类药剂的抗性狭义遗传力[J]. 植物保护学报, 2000, 27(2): 183–187
Meng X Q, Rui C H, Zhao J Z, et al. Narrow sense herttability of resistance to pyrethroids in *Heucoverpa armigera* Hübner[J]. Acta Phytophylacica Sinica, 2000, 27(2): 183–187

[14] 何林. 朱砂叶螨(*Tetranychus cinnabarinus*)抗药性机理及抗性适合度研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2003
He L. Study on pesticide resistance mechanisms and resistant fitness of *Tetranychus cinnabarinus* (Boiduval)[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2003

[15] 何恒果. 桔全爪螨对甲氰菊酯和阿维菌素的抗性及其酯酶基因的克隆与表达研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010
He H G. Fenpropathrin and avermectin resistance, and esterase gene cloning and expression in *Panonychus citri* (McGregor) [D]. Chongqing: Southwest University, 2010

[16] 柏亚罗. 具有不同作用机理的杀螨剂[J]. 现代农药, 2005, 4(3): 27–30
Bo Y L. Acaricides with different modes of action[J]. Modern Agrochemicals, 2005, 4(3): 27–30

[17] 宋丽雯, 沈一凡, 岳秀利, 等, 截形叶螨抗哒螨灵品系和敏感品系体内解毒酶活性的变化[J]. 昆虫学报, 2014, 57(3): 323–329
Song L W, Shen Y F, Yue X L, et al. Change of detoxification enzyme activities in the pyridaben- resistant and susceptible strains of *Tetranychus truncatus* (Acarina: Tetranychidae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2014, 57(3): 323–329

[18] 宋丽雯, 沈慧敏. 温度对截形叶螨抗哒螨灵种群和敏感种群发育与繁殖的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(6): 668–674
Song L W, Shen H M. Effect of temperature on development and fecundity of pyridaben resistant and susceptible populations of *Tetranychus truncates* Ehara (Acari: Tetranychidae)[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(6): 668–674

[19] 陈德豪, 张琰. 常用阻尼最小二乘算法的改进[J]. 武测科

技, 1994(1): 31–35
Chen D H, Zhang Y. Correction of the common damped least square method[J]. WTUSM Bulletin of Science and Technology, 1994(1): 31–35

[20] 张凤举, 吴进才. 王–兰–丁模型的参数估算及应用[J]. 江苏农学院学报, 1993, 14(2): 73–77
Zhang F J, Wu J C. Estimate of the parameters of Wang-Lan-Ding model and it application[J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1993, 14(2): 73–77

[21] Tabashnik B E. Resistance risk assessment: Realized heritability of resistance to *Bacillus thuringiensis* in diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae), tobacco budworm (Lepidoptera: Noctuidae), and colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae)[J]. Journal of Economic Entomology, 1992, 85(5): 1551–1559

[22] 何恒果, 赵志模, 闫香慧, 等. 桔全爪螨对阿维菌素和甲氰菊酯的抗性现实遗传力及风险评估[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2147–2152
He H G, Zhao Z M, Yan X H, et al. Resistance realized heritability and risk assessment of *Panonychus citri* to avermectin and fenpropathrin[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8): 2147–2152

[23] 贾变桃, 洪珊珊, 王龙. 小菜蛾对溴虫腈抗性筛选、风险评估及交互抗性研究[J]. 应用生态学报, 2015, 37(1): 90–95
Jia B T, Hong S S, Wang L. Selection, risk assessment and cross-resistance of resistance to chlorfenapyr in the diamond-back moth, *Plutella xylostella* (L.)[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 37(1): 90–95

[24] Lozinskaya Y L, Slepneva I A, Khramtsev V V, et al. Changes of the antioxidant status and system of generation of free radicals in hemolymph of *Galleria mellonella* larvae at microsporidiosis[J]. Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology, 2004, 40(2): 119–125

[25] Patil N S, Lole K S, Deobagkar D N. Adaptive larval thermotolerance and induced cross-tolerance to propoxur insecticide in mosquitoes *Anopheles stephensi* and *Aedes aegypti*[J]. Medical and Veterinary Entomology, 1996, 10(3): 277–282

[26] 莫建初, 唐振华. 数量遗传学在害虫种群抗性进化研究中的应用[J]. 昆虫知识, 1997, 34(3): 183–186
Mo J C, Tang Z H. The application of quantitative genetics in resistant evolution of pest population[J]. Entomological Knowledge, 1997, 34(3): 183–186